

波長 2.05 μm の CO₂ 計測用ヘテロダイン DIAL 光学系の開発

Development of the optics of Heterodyne DIAL for CO₂ measurements whose wavelength is 2.05 μm

福岡大岳、水谷耕平^[1]、石井昌憲^[1]、板部敏和^[1]、青木哲郎^[1]、
石川隆祥^[2]、浅井和弘^[3]、佐藤篤^[3]、菅博文

Hirotake Fukuoka, Kohei Mizutani^[1], Shoken Ishii^[1], Toshikazu Itabe^[1], Tetsuo Aoki^[1],
Takayoshi Ishikawa^[2], Kazuhiro Asai^[3], Atsushi Sato^[3], Hirofumi Kan

浜松ホトニクス (株)、^[1] (独) 情報通信研究機構、^[2] (株) 日本アレフ、^[3] 東北工業大学
Hamamatsu Photonics K.K., ^[1]National Institute of Information and Communications Laboratory,
^[2]Nippon Aleph Corp., ^[3]Tohoku Institute of Technology

Abstract

A Heterodyne Differential Absorption Lidar (DIAL) for CO₂ measurements whose wavelength is 2.05 μm has been developed. The major merit of Heterodyne detection is the capability to observe regardless of daytime or nighttime. A diode-pumped single frequency Tm:Ho:YLF laser was utilized as the laser transmitter. The cold gas cooled side pumping module was developed so that high pulse energy can be obtained, and the laser transmitter operates at pulse repetition frequency of 30Hz and emits output energy of 84mJ/pulse with pulse width of 138nsec. The receiving optics consists of 100mm off-axis telescope and fiber based optics. This paper introduces the details of the Heterodyne DIAL and some examples of observation results.

1. はじめに

大気中の CO₂ 濃度の急激な上昇は気候変動の一つの原因として注目されている。しかしながら大気中の CO₂ のソースとシンクの挙動は必ずしも解明されておらず、空間的・時間的な大気中の CO₂ 分布の高精度測定は気候変動の理解とその予測に対して非常に重要であると考えられている。我々は昼夜を問わず大気中の CO₂ 分布を計測する手段として、アイセーフティな波長 2.05 μm で発振する Tm:Ho:YLF レーザを光源とするヘテロダイン差分吸収ライダーの開発を進めている。[1]

波長 2.05 μm で発振する Tm:Ho:YLF の Ho³⁺ の発振線は準 3 準位レーザーであるが、レーザー結晶を冷却することにより比較的高効率に発振させることができる。我々は、冷却系を含めて比較的簡便に光学系全体を構成できて、かつ高パルスエネルギーを得る為に、低温ガスを循環させてレーザーロッドを冷却する側面励起型の励起モジュールを開発した。[2] それを用いて CO₂ による吸収が強い λ -On 波長(2050.967nm)と CO₂ による吸収が弱い λ -Off 波長(2051.250nm)を交互に出射して CO₂ 分布を計測するヘテロダイン差分吸収ライダーを構築した。特にヘテロダイン検波方式とすることで昼間でも背景光ノイズの影響を受けずに観測することが可能となった。ここでは、光学系の開発成果を報告する。

2. 低温ガス冷却型側面励起モジュール

Fig.1 に Tm:Ho:YLF レーザのエネルギー準位構造と励起・発振波長の関係を示す。[3] 励起は Tm³⁺ の基底準位から ³F₄ へ波長 0.79 μm 帯の半導体レーザーで励起し、クロス緩和により ³H₄ へ遷移する。その後、Tm³⁺ の

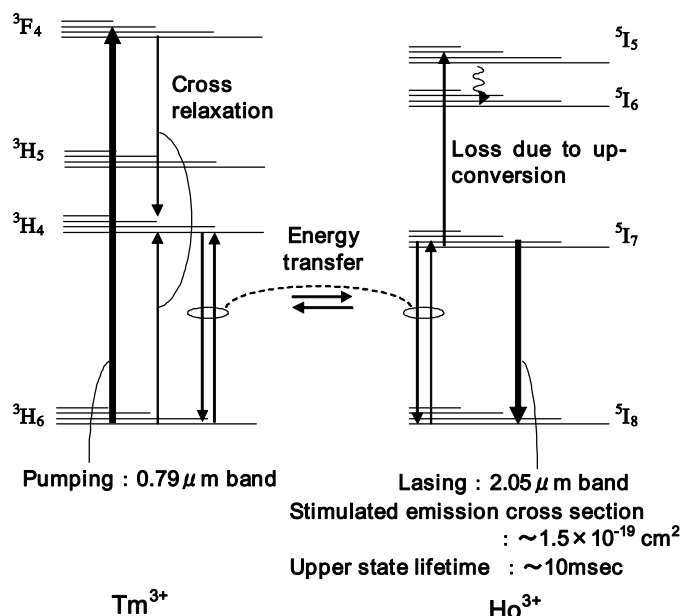


Fig. 1 Energy levels of Tm:Ho:YLF and pumping and lasing wavelength

${}^3\text{H}_4$ から Ho^{3+} の ${}^5\text{I}_7$ へのエネルギー移譲過程により、レーザ上準位が蓄積される。レーザ下準位である Ho^{3+} の ${}^5\text{I}_8$ は13の Stark レベルに分離しており、それぞれの Stark レベルに Boltzmann 分布に従って分配される。[4] レーザ下準位の分布の幅は 315cm^{-1} と比較的小さいため、室温ではレーザ下準位の上方の Stark レベルの Boltzmann 因子も大きくなるが、低温に冷却すると上方の Stark レベルの Boltzmann 因子が小さくなり、レーザ遷移 (Ho^{3+} の ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$)の比較的大きい誘導放出断面積 ($1.5 \times 10^{-19}\text{cm}^2$ 程度)も手伝って高パルスエネルギーを得やすいレーザとなる。また、冷却により Tm^{3+} の ${}^3\text{H}_4 \rightarrow \text{Ho}^{3+}$ の ${}^5\text{I}_7$ へのエネルギー移譲過程においても、平衡時に Tm^{3+} の ${}^3\text{H}_4$ に分配される割合が室温時に比べて小さくなる点も低温冷却した場合の利点である。以上が $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YLF}$ レーザを低温冷却して使用している理由である。

低温ガス冷却型側面励起モジュールの断面模式図を Fig.2 に示す。 $\phi 4\text{mm} \times 44\text{mmL}$ の $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YLF}$ レーザロッドは低温ヒートシンクから伝導冷却される。低温ヒートシンクには断熱膨張により -80°C 程度の低温となった冷媒ガスが流れ、低温に冷却している。励起用半導体レーザの出力光は、低温ヒートシンクの周囲3方向に設けられたスリットに挿入された導光板を通してレーザロッドに照射される。励起モジュール全体は、結露防止のため真空容器に格納している。Fig.3 にレーザロッド断面の励起分布を示す。図のように3方向からの励起を反映した励起分布となった。本励起モジュールは、均一励起ではないが発振器として使用するには問題なく、適切に共振器を設計することによりほぼ横シングルモードのビームを取り出すことができた。

この励起モジュールを使用して、ほぼ横シングルモードで発振する共振器長 3.86m のリングレーザ発振器を構成した。この発振器で、繰返し 20Hz において励起用半導体レーザ光出力 1.4J に対して $2\mu\text{m}$ レーザ出力 100mJ 、パルス幅 125nsec を得た。

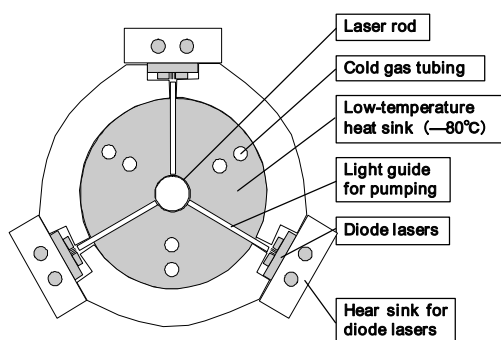


Fig. 2 Schematic diagram of the cross section of cold gas cooled side-pumping module

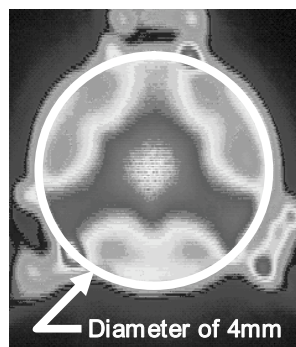


Fig. 3 Pumping profile of the laser rod

3. λ -On 波長と λ -Off 波長の選択

HITRAN データベースで計算した標準大気モデル (U.S. Standard Atm. (1976)) の1気圧・ 296K におけるパス長 1km の吸収率と λ -On 波長および λ -Off 波長の関係を Fig.4 に示す。 λ -On 波長としては他分子による吸収の影響のない CO_2 のR30吸収線のピーク波長である 2050.967nm 、 λ -Off 波長として CO_2 の吸収の小さい 2051.250nm を選択した。

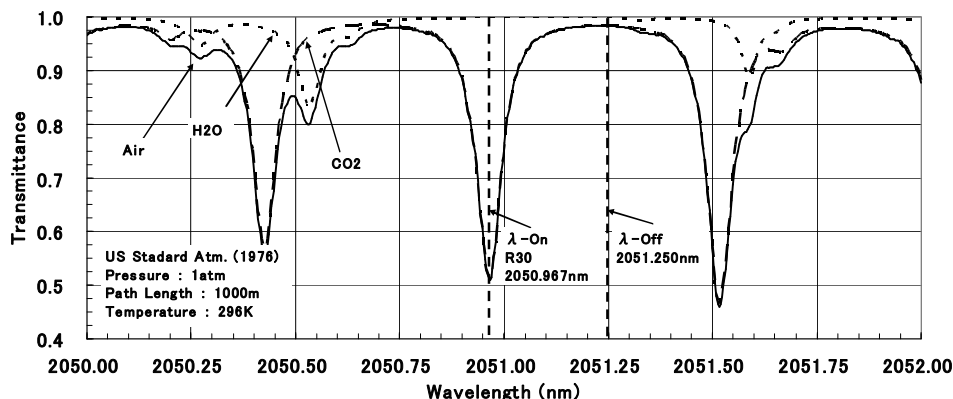


Fig. 4 Optical transmittance of air from HITRAN database

4. CO₂計測用ヘテロダイン DIAL 光学系

2 節で述べたレーザ発振器をメイン発振器として用いて、CO₂ 計測用ヘテロダイン差分吸収ライダーを構築した。光学系の構成図を Fig.5 に示す。λ-On 波長及びλ-Off 波長の各々で発振する 2 個の CW-Tm:Ho:YLF レーザは、メイン発振器のシードレーザとして使用するとともに、ヘテロダイン検波のローカル光としても使用した。λ-On 波長のシードレーザは CO₂ ガスセルを用いて CO₂ の吸収線にアクティブに波長固定した。メイン発振器は共振器長 3.86m のリング共振器となっており、シードレーザの出力光を AOM で +105MHz だけ周波数シフトさせた光をシード光として使用し、ramp-and-fire 法によりインジェクションシーディングして単一縦モード化した。発生したレーザパルスは口径φ100mm の軸外し望遠鏡より送信される。送信と受信は同軸となっており、エールゾルで後方散乱された光は望遠鏡で受信され、偏波保持ファイバで構成される受信系へ導かれる。システム効率が最大となるよう、φ100mm の望遠鏡開口に対して送信・受信ともビーム径はφ80mm (@e⁻²) とした。[5] λ-On 波長およびλ-Off 波長の波長切替は 5 秒おきに行なった。その他主要な動作条件を Table 1 に示す。

Table 1 Operating conditions of Heterodyne DIAL for CO₂ measurements

Laser output energy	84 mJ / pulse	Transmitting energy from the telescope is 72 mJ / pulse due to optical losses.
Pulse width (FWHM)	138 nsec	Corresponding bandwidth is 3.2MHz for Fourier transform limited pulse.
Repetition rate	30 Hz	
Shot noise – other noise ratio of the balanced receiver	~2 dB	

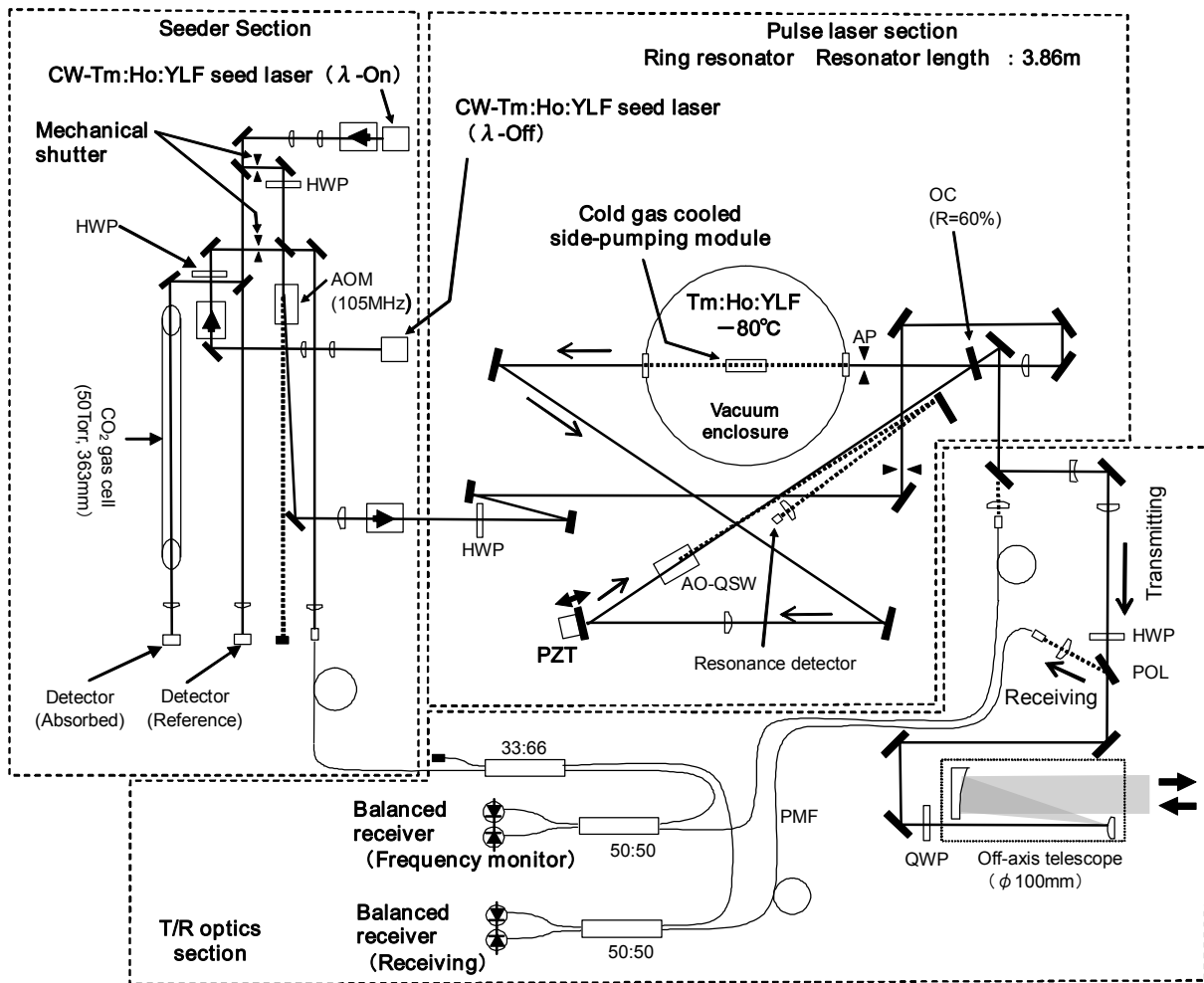


Fig.5 Optics of Heterodyne DIAL for CO₂ measurements

5. 受信信号の例

この DIAL 装置を用いて得られた受信信号の例を示す。Fig.6 に λ -On 波長と λ -Off 波長の各距離に対する受信信号強度の差の例を示す。2.4km と 6.1km にピークが見られるのは、送信ビームの一部がハードターゲットに当たっている為である。Fig.6 から λ -On 波長と λ -Off 波長では明確に信号強度が異なっていることが分かる。

また、本装置はドップラーシフト周波数から風速の LOS 成分の測定も可能である。Fig.7 は距離 9.75~11.25km のエアゾルの後方散乱光を受信して得られたビート信号である。この信号を FFT して得られたスペクトルを Fig.8 に示す。ピーク周波数を周波数モニター信号と比較すると +1.7MHz シフトしている。この波長帯では、1m/sec に対して 1MHz のドップラーシフトが生じるので、この場合は LOS 方向の風速が +1.7MHz (向かってくる方向) ということが分かる。このようにして λ -OFF 波長ではアレーシング回数にもよるが水平方向で 10km 以上程度の風速検知ができています。

6. まとめ

大気中の CO_2 濃度分布を計測するためのヘテロダイン DIAL の光学系を開発した。光源には波長 $2.05\mu\text{m}$ の光を発生する Tm:Ho:YLF レーザを用いた。レーザ光を効率よく発生させる為、低温ガス冷却型側面励起モジュールを開発し、それを組込んで CO_2 計測用ヘテロダイン差分吸収ライダーを構成し、観測を開始した。 λ -ON 波長と λ -OFF 波長ではエコーの強度に明確な差が見られた。

参考文献

- [1] 石井他, 「温室効果ガス計測のための差分吸収ライダーの開発」, 第 25 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, pp.4-5, 2007.
- [2] 福岡他, 「 CO_2 ライダー用低温ガス冷却型 $2\mu\text{m}$ レーザの開発」, レーザー学会学術講演会第 28 回年次大会, E4-1aIV9, 2008.
- [3] D. Bruneau, et.al., "Modeling of Tm, Ho:YAG and Tm, Ho:YLF 2- μm Lasers and Calculation of Extractable Energies", Appl Opt., Vol.37, pp8406-8419, 1998.
- [4] A. Kaminskii, "Crystalline Lasers: Physical Processes and Operating Schemes", CRC Press, 1996.
- [5] J. Y. Wang, "Optimal truncation of a lidar transmitted beam", Appl. Opt. Vol.27, pp.4470-4474, 1988.

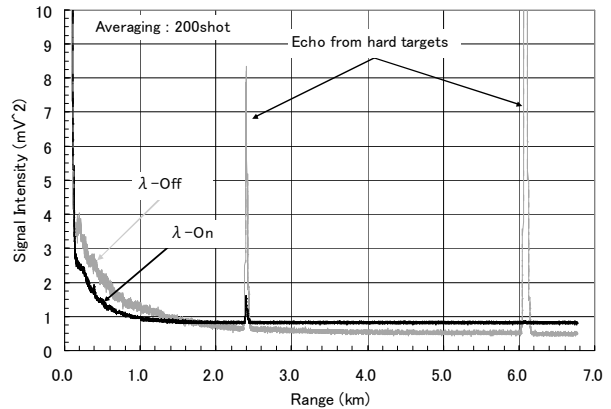


Fig.6 An example of the received signal intensity data of Heterodyne DIAL

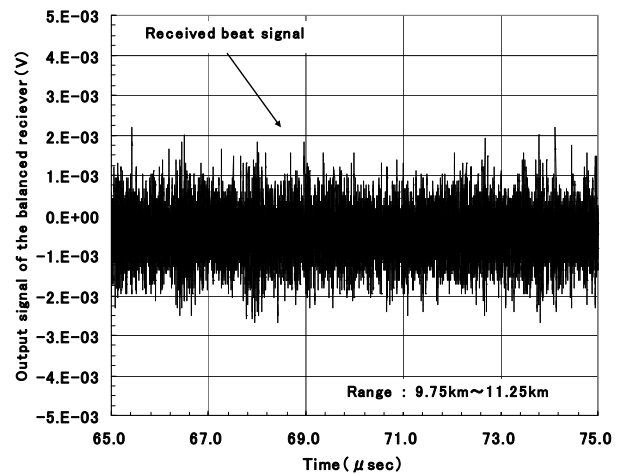


Fig.7 A example of received beat signal

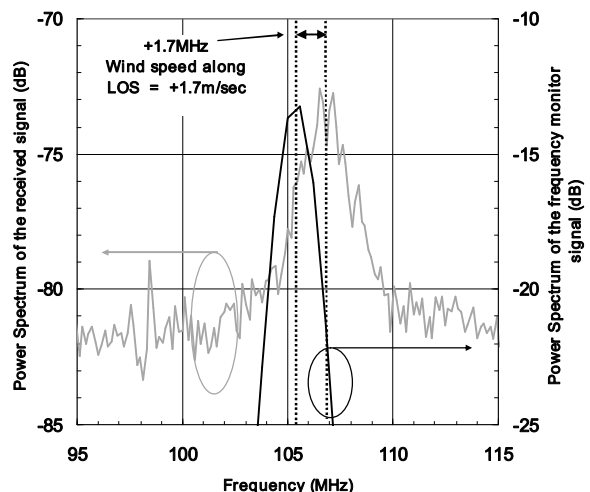


Fig.8 FFT analysis of the received beat signal